DOI 10.37882/2223–2966.2022.12–2.34

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ СЕТИ СВЯЗИ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ[1]

SOLVING THE PROBLEM OF PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF THE COMMUNICATION NETWORK BY THE METHOD OF DIFFERENTIAL EVOLUTION

D. Tausnev
K. Gaipov

Summary. This article presents a method for solving a mathematical model of the optimal distribution of information flows with simultaneous search for channel bandwidth values, provided that the bandwidth value can vary discretely, and therefore the differential evolution method was used to solve such a problem. The criterion of optimality in solving the synthesis problem is the minimum total intensity of losses. A feature of the proposed method of differential evolution is the use of numerical methods for solving systems of nonlinear equations to adapt individuals to the constraints of the problem.

Keywords: differential evolution, traffic routing, conditional optimization.

Тауснев Даниил Алексеевич.
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
mr.tays@bk.ru
Гаипов Константин Эдуардович
Ведущий научный сотрудник научной лаборатории Спутниковые телекоммуникационные системы; кандидат тех. наук, Сибирский государственный университет науки и технологии им. академика М.Ф. Решетнева
gaipovke@yandex.ru

Аннотация. В данной статье приведён способ решения математической модели оптимального распределения информационных потоков с одновременным поиском значений пропускных способностей каналов при условии, что значение пропускных способностей может изменяться дискретно, в связи с чем для решения такой задачи был применён метод дифференциальной эволюции. Критерием оптимальности при решении задачи синтеза является минимальная суммарная интенсивность потерь. Особенностью предлагаемый метода дифференциальной эволюции является использование численных методов решения систем нелинейных уравнений для адаптации индивидов под ограничения задачи.

Ключевые слова: дифференциальная эволюция, маршрутизация трафика, условная оптимизация.

Введение

Одним из решений повышения качества функционирования сети является точное определение оптимальных маршрутов передачи данных и быстрое переключение более загруженных каналов связи на другие — свободные каналы. Несмотря на довольно обширный список работ [1–13] и различных технических реализаций в виде программ для ЭВМ [14–17], существующие механизмы не решают задачу параметрического синтеза пропускных способностей каналов связи с целью нахождения оптимальной маршрутизации трафика с потерями. В качестве способа получения математической модели распределения трафика за основу был выбран контурный метод анализа с потерями математическая модель которого реализована в [18]. В качестве альтернативного варианта, который можно было использовать за основу, является метод предложенный в [19], но в отличие от контурного метода данный способ предполагает поиск всех беспетельных маршрутов [20], что для сетей большой размерности приводит к резкому увеличению оптимизируемых переменных. В связи с разработанной моделью была сформулирована задача оптимизации. Данная задача представляет особую трудность для классических детерминированных алгоритмов оптимизации, так как имеет большое количество вещественных и дискретных переменных, ограничений-равенств и неравенств, а также разрывную целевую функцию. Для решения поставленной задачи

[1] Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева

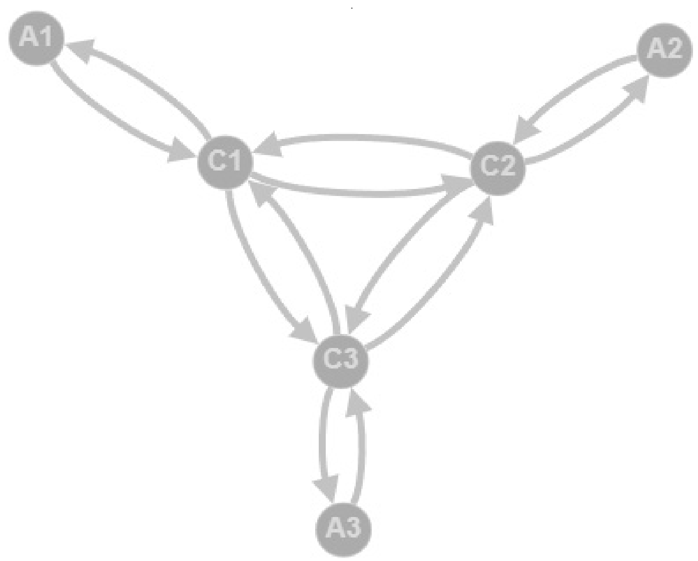

Рис. 1. Пример сети с тремя абонентами и тремя промежуточными узлами

был модифицирован и реализован алгоритм дифференциальной эволюции.

Постановка задачи

Пусть дана сеть с n абонентами и n промежуточными узлами (см. пример на рис. 1). Известны следующие технические характеристики сети: μ_{ij} — интенсивность обслуживания канала от узла C_i к узлу C_j (далее H_{ij}) и N_{ij} — число мест в буфере соответствующего канала ($i \neq j$, $i, j = \overline{1,n}$). Известно количество информации c_{ij} ($i \neq j$, $i, j = \overline{1,n}$), которое необходимо передать от абонента A_i к абоненту A_j.

Обозначим за x_{ijk} количество информации от абонента A_k, проходящей по каналу H_{ij} ($i \neq j$, $i, j, k = \overline{1,n}$). Соответственно

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^{n} x_{ijk} \text{ —}$$

общее количество информации, проходящей по каналу H_{ij}. Обозначим за inp_i общее количество информации, исходящей от абонента A_i.

Соответственно $inp_{ij} = \begin{cases} inp_i, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$.

Обозначим за e_{ijk} — количество информации от абонента A_k, потерявшейся в H_{ij} ($i \neq j$, $i, j, k = \overline{1,n}$). Соответственно

$$e_{jk} = \sum_{i=1}^{n} e_{ijk} \text{ —}$$

общее количество информации от абонента A_k, потерявшейся в узле C_j.

С другой стороны, количество информации от абонента A_k, потерявшейся в узле C_j равно разнице между количеством вошедшей информации и количеством вышедшей. Иными словами,

$$e_{jk} = \sum_{i=1}^{n} x_{ijk} - \sum_{i=1}^{n} x_{jik} - c_{kj} + inp_{jk} \quad (1)$$

Для нахождения численного решения необходимо задаться значением функции вероятности потерь, классическим вариантом можно считать, что потоки, создаваемые источниками обладают экспоненциальным распределением интервалов между вызовами, а время обслуживания также распределено по экспоненциальному закону, в такой ситуации математической моделью каждого канала будет система массового обслуживания M/M/1/N. Поскольку в формулу вероятности потерь входят еще значения числа мест в буфере, а также значение интенсивности обслуживания.

Таким образом можно записать следующее:

$$e_{ijk} = x_{ijk} \cdot p_{ij} \quad (2)$$

где:

$$p_{ij} = \frac{1 - \frac{x_{ij}}{\mu_{ij}}}{1 - \left(\frac{x_{ij}}{\mu_{ij}}\right)^{N_{ij}+1}} \cdot \left(\frac{x_{ij}}{\mu_{ij}}\right)^{N_{ij}} \quad (3)$$

обобщая уравнения (1), (2) и (3), получаем:

$$e_{jk}=\sum_{i=1}^{n}x_{ijk}\cdot\frac{1-\dfrac{x_{ij}}{\mu_{ij}}}{1-\left(\dfrac{x_{ij}}{\mu_{ij}}\right)^{N_{ij}+1}}\cdot\left(\frac{x_{ij}}{\mu_{ij}}\right)^{N_{ij}}=$$
$$=\sum_{i=1}^{n}x_{ijk}-\sum_{i=1}^{n}x_{jik}-c_{kj}+inp_{jk} \qquad (4)$$

В реальной ситуации имеется возможность перераспределять интенсивность обслуживания потоков, но лишь на дискретную величину. Таким образом, вместо известных μ_{ij} имеем: $\Delta\mu_i$ и M_i такие, что

$$M_i=\sum_{j=1}^{n}\mu_{ij},\quad где\ \mu_{ij}\in\{k\cdot\Delta\mu_i\,|\,k\in\mathbb{Z}_+\} \qquad (5)$$

Критерием оптимизации маршрута является минимизация потерь:

$$E=\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}e_{jk}\to\min \qquad (6)$$

В итоге: имеется задача смешанной оптимизации с n^3-n^2+n вещественными переменными (x_{ijk} и inp_i), n^2-n дискретными переменными (μ_{ij}), $2n^2$ ограничениями–равенствами ((1) и (2)), n^3-n^2+n ограничениями–неравенствами

($x_{ijk}\geq 0$ и $inp_i\geq 0$) и целевой функцией (6).

Выбор алгоритма оптимизации.

Описанная выше задача оптимизации является очень сложной по следующим причинам:

1. Ничего нельзя сказать о топологии целевой функции, например, является она полимодальной или унимодальной? Поэтому, детерминированные алгоритмы локальной оптимизации не могут дать нам гарантированно оптимального результата даже при многократном запуске.
2. Часть переменных дискретна, из чего следует, что методы оптимизации первого и второго порядка, такие как всевозможные методы градиентного спуска, метод Ньютона, метод Марквардта, метод Флетчера-Ривса, метод Дэвидона-Флетчера-Пауэлла и им подобные не подходят для решения данной задачи.

Задача имеет большую размерность, уже при $n=10$ имеется около 1000 переменных различного рода.

Задача имеет много ограничений равенств и неравенств, что затрудняет поиск даже одного допустимого решения (которое необходимо как стартовая точка для некоторых методов).

Целевая функция имеет области неопределённости (например, при $\mu_{ij}=0$).

Для решения поставленной задачи будет использован алгоритм дифференциальной эволюции. Преимуществами данного алгоритма являются следующие факты:

1. Алгоритм относится к алгоритмам нулевого порядка, то есть не требует знаний о градиенте целевой функции, что позволит его использовать, как для этой, так и для более сложных моделей.
2. Алгоритм является стохастическим, что позволяет ему не сходиться к ближайшему локальному оптимуму, а искать более широко.
3. Алгоритм хорошо зарекомендовал себя при оптимизации целевых функций со сложной топологией: он может работать с прерывистыми функциями, с функциями, имеющими области постоянства, и с полимодальными функциями.
4. Алгоритм легко модифицируется, его можно изменять под конкретную задачу. Есть версии алгоритма для задач больших размерностей, а также для задач с ограничениями, что является необходимым в текущей задаче.
5. Алгоритм позволяет работать как с вещественными, так и с дискретными переменными.

Описание используемого алгоритма дифференциальной эволюции.

Для решения задачи оптимизации выполняются следующие шаги:

1. Инициализация популяции случайными значениями
2. Адаптация индивидов под ограничения задачи
3. Вычисление значений целевой функции для каждого индивида
4. Назначение штрафов для каждого индивида
5. Назначение пригодности каждому индивиду
6. Если достигнут критерий остановки, завершить работу алгоритма, в качестве результата взять лучшего индивида
7. Генерация нового поколения
8. Перейти к шагу 2

Адаптация индивидов под ограничения производится следующим образом: для реализации естественных ограничений ($x_{ijk}\geq 0$ и $inp_i\geq 0$) каждая компонента индивида берётся по модулю. Для выполнения ограничений (5) каждая компонента μ_{ij} округляется до ближайшего значения, далее одна из μ_{ij} выражается из соответствующего уравнения. Для удовлетворения ограничений (4) фиксируются n^3-n^2 переменных, а относительно оставшихся переменных численно решается система линейных уравнений (4). В данной

Таблица 1. Результаты численных экспериментов

Номер задачи	Количество абонентов	Потери информации до оптимизации	Потери информации после оптимизации	Коэффициент снижения потерь
1	4	9.23%	2.09%	4.5
2	4	7.1%	0.14%	51
3	6	11.7%	1.5%	8
4	7	7.66%	1.48%	5

работе для численного решения использовался метод простой итерации, описанный ниже. В следствие решения системы уравнений некоторые переменные могут стать меньше нуля, именно на таких индивидов в дальнейшем накладывается большой аддитивный штраф, вычисляемый по формуле:

$$shtraph = -K\sum_{x_i \in S} x_i, \quad где\ S = \{x_k < 0\} \tag{7}$$

Генерация новых индивидов проходит согласно следующему алгоритму:

1. Задать параметры алгоритма: $0 \le C \le 1$ и $F > 0$
2. Выбрать случайных индивидов a, b и c
3. Сгенерировать «мутанта» $mut = a + F(b - c)$
4. Перемешать индивида и мутанта (с вероятностью C выбираются координаты исходного индивида и с вероятностью $1 - C$ — «мутанта»)
5. Вычислить пригодность нового индивида
6. Если новый индивид лучше, заменить старого индивида

Метод простой итерации

Метод итерации или метод простой итерации — численный метод решения системы линейных алгебраических уравнений. Суть метода заключается в нахождении по приближённому значению величины следующего приближения, являющегося более точным.

Метод позволяет получить значения корней системы с заданной точностью в виде предела последовательности некоторых векторов (в результате итерационного процесса). Характер сходимости и сам факт сходимости метода зависит от выбора начального приближения корня.

Пусть дана система из n нелинейных уравнений с n неизвестными:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \tag{8}$$

Для применения метода приведём систему к равносильному виду:

$$\begin{cases} x_1 = h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_2 = h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ x_n = h_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \tag{9}$$

Шаг 1. Зададим начальное значение вектора решений $x^{(0)}$, некоторое малое число e и положим $k = 0$

Шаг 2. Вычислим следующее значение вектора переменной по формуле:

$$\begin{cases} x_1^{(k+1)} = h_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ x_2^{(k+1)} = h_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \\ \vdots \\ x_n^{(k+1)} = h_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}) \end{cases} \tag{10}$$

Шаг 3. Как только выполняется условие остановки

$$\max(|\, x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)} \,|) < e$$

расчет окончен, в противном случае — $k = k + 1$, переходим к шагу 2.

Результаты экспериментальных исследований

Случайным образом было сгенерировано 4 задачи, с 4, 4, 6 и 7 абонентами соответственно. Результаты сравнения потерь информации до и после оптимизации представлены в таблице 1.

Стоит отметить, что нельзя сделать никаких выводов о том, насколько хорошо алгоритм решает поставленную задачу, так как нам неизвестно, решал ли кто-либо задачу оптимальной маршрутизации трафика в такой постановке. Если же сравнивать потери информации до оптимизации с потерями информации, при отправки всей информации напрямую, можно сделать вывод, что алгоритм отработал успешно, так как потери информации сократились в несколько раз на каждой экспериментальной сети.

Заключение

В данной работе была разработана математическая модель маршрутизации трафика в сети. Разработан и реализован алгоритм решения задачи оптимизации маршрутизации трафика с критерием минимизации потерь. На численных экспериментах алгоритм показал хорошие результаты (по сравнению с примитивным решением).

Перспективные направления разработки:

1. Применение алгоритма для решения задачи оптимизации маршрутизации трафика при использовании других моделей и критериев.
2. Реализация усовершенствованного алгоритма дифференциальной эволюции для ускорения и увеличения качества решения задачи.
3. Реализация более современного метода численного решения системы нелинейных уравнений для ускорения алгоритма.
4. Время работы алгоритма значительно возрастает с ростом количества абонентов. В связи с этим представляется целесообразным создание базы данных оптимальных распределений, которую можно использовать для обучения регрессионных моделей (например, нейронных сетей), которые могут генерировать хорошую отправную точку для работы Дифференциальной эволюции, что значительно увеличит скорость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moy J. OSPF Version 2, STD54, RFC2328, April 1998.
2. Sridharan, Guerin R., Diot C. Achieving near-optimal traffic engineering solutions for current OSPF/IS-IS networks, in IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 13, 2005, pp. 234–247.
3. Yen J.Y., Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network, Management Наука, том 17, № 11, С. 712–716, 1971.
4. Awduche D., Chiu A., Elwalid A., Widjaja I., Xiao X.,, Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. // RFC3272, 2002. URL: http://www.ietf.org/rfc/rfc3272.txt.
5. Sharafat A.R., Das S., Parulkar G.M., McKeown N. MPLS-TE and MPLS VPN Swith OpenFlow, ACM SIGCOMM 2011 Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications, Toronto, ON, Canada, August 2011.
6. Shibanov P., Koryachko V.P., Izhvanov Y.L. Modeling of Aggregated Telecommunication Link with Technology of OpenFlows, Radioengineering, 2012, No.3, pp.109–112.
7. Lemeshko A.V., Vavenko T.Y. Improvement of Flow Model of Multipath Routing on the Basis Load Balancing, Problems of telecommunications, 2012, Vol.6, № I, pp. 12–29.
8. Lemeshko A.V., Vavenko T.V. Development and Research of the Flow Model of Adaptive Routing in the Software-Defined Networks with Load Balancing, Proc. of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics [Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravlenija i Radiojelektroniki], Vol.29, No.3, pp. 100–108.
9. Merindol P. Improving Load Balancing with Multipath Routing, Proc. of the 17-th International Conference on Computer Communications and Networks (IEEE ICCCN2008), 2008, pp. 54–61.
10. Mikhailenko V.S., Solodovnik M.S. Analysis of the Adaptive Neural Network Router, Automatic Control and Computer Science, 2016, Vol.50, № I, pp. 46–53.
11. Perepelkin D.A., Tsyganov I. Yu. Algorithm of paired transitions in computer networks based on the subnet routing method // Bulletin of RGRTU, 2016, No. 57, pp. 56–62.
12. Goulamghoss M.I., Bassoo V. Analysis of traffic engineering and fast reroute on multiprotocol label switching. J Ambient Intell Human Comput 12, 2409–2420 (2021). URL: https://doi.org/10.1007/s12652–020–02365–5
13. Papan J., Segec P., Yeremenko O., Bridova I., Hodon M. Enhanced Multicast Repair Fast Reroute Mechanism for Smart Sensors IoT and Network Infrastructure. Sensors 2020, 20, 3428. URL: https://doi.org/10.3390/s20123428
14. Модуль динамической балансировки потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества сетевых сервисов. Патент № 2017615438. Российская Федерация, № 2017612610, заявл. 22.03.2017, опубл. 16.05.2017; Перепелкин Д.А., Бышов В.С.
15. Модуль многопутевой маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях на базе протокола OpenFlow. Патент № 201761264. Российская Федерация, № 2016660593, заявл, 13.10.2016, опубл. 02.03.2017. Перепелкин Д.А., Иванчикова М.А.
16. Программа динамической межузловой балансировки трафика. Патент № 2015662938. Российская Федерация, № 2015618100, заявл. 04.09.2015, опубл. 20.01.2016 / Исхоков Д.С., Зарипова Э.Р.
17. Система многопутевой адаптивной маршрутизации и балансировки нагрузки в динамических корпоративных сетях. Патент № 2015662569. Российская Федерация, № 2015619243, заявл. 05.10.2015, опубл. 20.12.2015. Перепелкин Д.А., Бышов Б.С.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684654 Российская Федерация. Оптимальное распределение трафика сети массового обслуживания на основе контурного метода по критерию минимума потерь: № 2022683987: заявл. 08.12.2022: опубл. 15.12.2022 /

К.Э. Гаипов, И.Л. Крикунов, А.А. демичева; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева».

19. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. / Перевод с англ. Н.Б. Лиханова и др.; Под ред. Б.С. Цыбакова. — М.: Мир, 1989, 544 с.
20. Демичев М.С., Гаипов К.Э. Алгоритм поиска беспетельных маршрутов // Программные системы и вычислительные методы. 2020. № 4.

© Тауснев Даниил Алексеевич (mr.tays@bk.ru), Гаипов Константин Эдуардович (gaipovke@yandex.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва